

TİTREMENİN İNSAN FİZYOLOJİSİNE ETKİSİ VE VAZOKONSTRİKSİYON İLE KARŞILAŞTIRILMASI

GİRİŞ

İnsan vücudu ile çevre arasında sürekli bir ısıl etkileşim söz konudur. Vücutta metabolik aktivitelerle üretilen ısıl enerji çevreye verilmek zorundadır. Bu işlem hem hayati fonksiyonların devamı hem de ısıl konfor için gereklidir [4]. Vücut sıcaklığının istenilen aralıkta kalması, vücuttan yayılan ısının dikkatli bir biçimde denetimi ile gerçekleşir. Vücut sıcaklığı, insanların kendilerini rahat, konforlu hissedebilmeleri için küçük bir aralıkta değişirken, aşırı sıcak veya soğukun etkilerinden korunmak için ise daha geniş bir aralıkta değişmektedir.

Isıl konfor insanların bulunduğu ortamdan duyduğu ısıl rahatlık veya ısıl çevreden hoşnut olma hali olarak tanımlanabilir [2]. Isıl konforu etkileyen temel parametreler çevresel ve kişisel olarak iki grupta toplanabilir. Çevresel parametreler, hava sıcaklığı, hava hızı, bağıl nem ve ortalama ışınım sıcaklığı, kişisel parametreler ise, giysi ve aktivitedir.

İnsanlar içinde buldukları ortama uyum sağlamada birtakım donanımlara sahiptir. Çevreye uyum sağlamada ve vücut sıcaklıklarının korunmasında deri çok önemli bir rol oynar. Deri ve deri altı dokuları vücudun doğal yalıtım sistemini oluştururlar. Aynı zamanda derideki kan damarları ihtiyaca göre genişleyerek (vazodilatasyon) veya daralarak (vazokonstriksiyon) deri bölgesindeki kan miktarını ayarlar. Böylece vücudun iç bölgesinden deriye ısı geçişi kontrol altında tutulmak suretiyle vücudun çevre koşullarına uyumu sağlanır. Normal koşullarda ve dinlenme durumunda yetişkin bir insanda kalp debisinin %5-10'u kadar kan deride bulunur. Sıcaklığın artmasıyla derideki kan akışı da artar. Sıcaklığın aşırı artması halinde kalpteki kan debisinin %50-60'ı deriye gönderilir [11,14].

Çevre koşullarına uyum sağlamada ve vücut sıcaklıklarının korunmasında vazokonstriksiyon ve vazodilatasyonun yanı sıra terleme ve titremenin de önemli ayarlayıcı rolleri vardır. Vücut terleme yoluyla etkin bir soğutma yapabilir. Yetişkin bir erkek için sürdürülebilir terlemenin üst sınırı yaklaşık olarak saatte 1 litredir. Bu 350 W/m²'lik bir soğumaya eşdeğerdir. Vücudun soğuması durumunda istem dışı devreye giren titreme mekanizması ise kaslarda üretilen ısıyı dolayısıyla vücut sıcaklığını artırır. Küçük kas gruplarında başlayan titreme, dinlenme durumundaki vücudun toplam ısı üretimini 1.5 ile 2 katına çıkarırken oldukça şiddetli bir hal aldığıda 6 katına kadar çıkarabilmektedir [2]. Soğuğa karşı kılların dikleşmesi de vücudun gösterdiği tepkilerdendir. Ancak bu mekanizma özellikle hayvanlarda daha önemlidir.

Isıl konfor çalışmalarında yaygın olarak Sürekli Rejim Enerji Dengesi ve İki Bölmeli Anlık Enerji Dengesi olmak üzere iki model kullanılır. Çalışmamızda, vücuttan olan ısı kayıpları, iç bölme ve deri tabakası sıcaklıkları, denetim sinyalleri ve kan debisi gibi çeşitli parametrelerin zamanla değişiminin incelenebilmesi için iki bölmeli anlık enerji dengesi modeli temel alınmıştır. Hazırlanan model kullanılarak, soğuk bir ortama giren bir insanda vücudun hangi durumlarında denetim mekanizmalarının harekete geçtiği, metabolizmayı ne yönde etkilediği ve vücuttan olan ısı kayıpları farklı koşullar altında incelenmiştir.

VÜCUDUN SOĞUĞA KARŞI KORUNMA MEKANİZMALARI

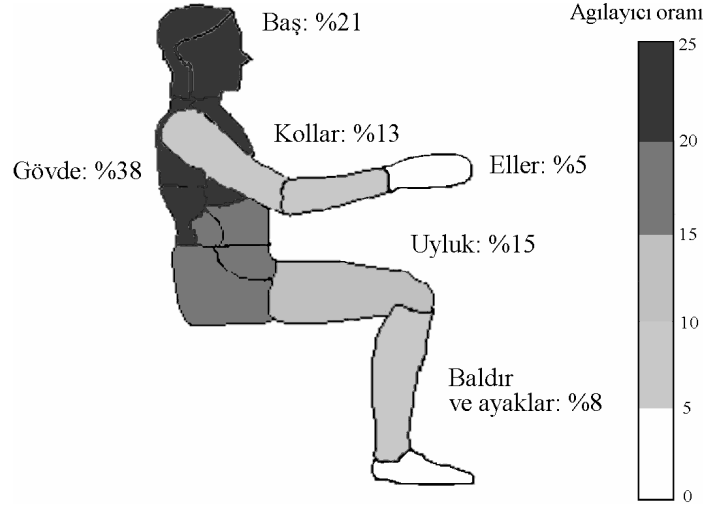
Vücudu oluşturan hücrelerdeki tüm kimyasal reaksiyonlar sonucu açığa çıkan enerji sonuçta ısıya dönüşür. Besinlerdeki enerjinin bir kısmı birçok hücre fonksiyonu için 'geçerli enerji' kaynağı olarak adlandırılan adenozin trifosfat (ATP) oluşumu sırasında, bir kısmı enerjinin ATP'den hücrelerin fonksiyonel sistemlerine transfer edilmesi esnasında kalan kısmı da bu fonksiyonel sistemlerde ısıya dönüşür. Sonuçta vücutta çeşitli kimyasal reaksiyonlarla açığa çıkan tüm enerjinin ısıya dönüştüğü kabul edilir [2,5].

Vücutta üretilen ısının çoğu iç organlarda özellikle karaciğer, beyin, kalp ve iskelet kaslarında oluşur. Sonra bu enerji, kan aracılığıyla vücudun diğer kısımlarına taşınır ve bölgesel ısınmalar engellenmiş olur. Bu nedenle enerjinin bedene eşit olarak dağıtılmasında kanın oldukça önemli bir rolü vardır [5,11]. İç organ ve dokulardan direkt temas ve kan akışı yoluyla deriye aktarılan ısı, buradan taşınım, ışıınım, buharlaşma ve kısmen de iletimle çevreye verilir. Bundan dolayı ısının kaybedildiği hız, özellikle iki faktörle belirlenir. Bunlar ısının vücut içinden deriye ve deriden çevreye aktarılabilme yetisidir [2,5].

Deri, deri altı dokuları ve özellikle deri altı dokularındaki yağ, vücuttaki ısı yalıtım sistemini oluştururlar. Yağ, diğer dokulara göre ısıyı yaklaşık üç kat oranında daha az iletmektedir. Deri altındaki bu yalıtkan sistem deri ile çevre sıcaklıklarının yaklaşmasına izin verse de iç sıcaklığın normal tutulmasında etkin bir rol oynar.

Vücudun çevreyle olan ısıl etkileşimi sırasında deriden çevreye olan ısı geçişinin arttığı durumlarda, fizyolojik denetim mekanizmaları normal vücut sıcaklığını korumak için harekete geçer ve vücut deriye olan kan akışını azaltır. Bu nedenle soğuk ortamlarda insanın ten rengi beyazlaşır. Bu durum, deriyi ve ona yakın dokuların sıcaklığının düşmesine neden olur, ancak iç dokuların sıcaklığını korur. Bu tepkinin olduğu bölgeye soğuğa karşı vazomotor denetim bölgesi denir. Bu bölgenin altına inildiği zaman, başka bir denetim mekanizması devreye girmediği sürece, derialtı ve iç dokuların sıcaklıkları zamanla düşer. Ancak vücut kendiliğinden titreme gibi işlemlerle ısı üretir. Üretilen ısı, çevreye olan ısı geçişini dengelerse, vücut iç sıcaklığı korunmuş olur. İç vücut sıcaklığını korumak için gösterilen fizyolojik çabaların yanında bireylerin gösterdiği davranışsal tepkilerde vardır. Bunlar daha kalın giysilerin giyilmesi, hareketlilik düzeyinin artırılması ve daha sıcak koşulların aranması şeklinde ortaya çıkar [2,3].

Vücudu soğuğa karşı koruyan vazokonstriksiyon (damarların kısılması) ve titreme gibi işlemler, sinirsel geri besleme mekanizması ile düzenlenir. Bu mekanizma beyin hacminin %0.3-0.5'ini teşkil eden hipotalamus tarafından kontrol edilir. Hipotalamusun ön kısmında vücudu sıcaklık artışından, arka kısmında ise sıcaklık düşümünden koruyan birer merkez vardır. Hipotalamusta bulunan bu merkezler vücut sıcaklığının korunmasıyla görevlidir. Geri besleme mekanizmasının işlemesi için vücut sıcaklığının yüksek ya da düşük olduğunu bildirecek algılayıcıların bulunması gerekir. Şekil 1'de deride bulunan algılayıcıların vücuttaki dağılımı görülmektedir. Hipotalamustaki ısı merkezleri, vücut sıcaklığının yüksek veya düşük olduğunu algılayıcılardan gelen sinyallere göre düşürücü veya yükseltici işlemleri başlatır [12,13].



Şekil 1. Derideki Sıcaklık Algılayıcıların Dağılımı [15]

Soğuk nedeniyle vücut iç sıcaklığı azalmaya devam ettiği durumlarda adrenal ve noradrenalin hormon salgısı artar. Bu hormonlar vücuttaki kimyevi olayları hızlandırarak, metabolizma hızını ve dolayısıyla ısı üretimini artırır. İç vücut sıcaklığında 2 °C'lik bir düşüş, çevreye daha fazla ısı kaybını önlemek için vücudun çabalarını en üst düzeye çıkarmasına ve had safhada titremeye neden olur. İç vücut sıcaklığında daha fazla düşüş ile birlikte vücudun kendini koruma çabalarında azalma görülür, bu durum ise sıcaklık düşümündeki hızı ivmelendirir. Yaklaşık 2 °C'den daha fazla düşüş, vücudun kendi kontrolünü kaybetmeye başlamasını beraberinde getirir ve bu durum hipotermi olarak adlandırılır [2,16]. Bunun aksi durumu yani vücut sıcaklığının aşırı yükselmesi hipertermidir ve hipotermi ile hipertermi durumları arasında deri bölgesindeki kan akışı açısından yaklaşık 4 kat fark vardır [1]. Hipertermi, vücut sıcaklığının yaklaşık 41 °C'nin üzerine çıkması durumunda gerçekleşir ve bu koşullar altında merkezi sinir sisteminin işlevleri bozulur [3].

MATEMATİKSEL MODEL

Isı Dengesi ve Isı Kayıpları

Gagge ve ark. (1971) tarafından geliştirilen iki bölmeli modelde anlık enerji dengesi iç bölme ve deri tabakası için yazılırsa;

$$S_{cr} = M - W - (C_{res} + E_{res}) - Q_{cr,sk} \quad (1)$$

$$S_{sk} = Q_{cr,sk} - (C + R + E_{sk}) \quad (2)$$

elde edilir. Eşitlik (2)'deki $(C+R+E_{sk})$ terimi deriden olan toplam ısı kaybını (Q_{sk}) vermekte ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$Q_{sk} = \frac{t_{sk} - t_o}{R_t} + \frac{w(p_{sk,s} - p_a)}{R_{e,t}} \quad (3)$$

burada, t_o operatif sıcaklıktır ve taşınım ve ışınım etkileri birleştirilerek bu parametre ile tanımlanabilir.

$$t_o = \frac{h_r t_r^* + h_c t_a}{h_r + h_c} \quad (4)$$

Giysilerden ve çevre havasından kaynaklanan toplam ısı ve buharlaşma direnci ise;

$$R_t = R_{cl} + \frac{1}{(h_r + h_c) f_{cl}} \quad (5)$$

$$R_{e,t} = R_{e,cl} + \frac{1}{h_e f_{cl}} \quad (6)$$

verilen eşitlikler yarımıyla hesaplanabilir [7]. Solunum yoluyla olan duyulur ve gizli ısı kayıpları ise sırasıyla;

$$C_{res} = n_{res} c_{p,a} (t_{ex} - t_a) / A_D \quad (7)$$

$$E_{res} = n_{res} h_{fg} (W_{ex} - W_a) / A_D \quad (8)$$

eşitlikleriyle hesaplanabilir. Burada,

$$n_{res} = K_{res} M \quad (9)$$

$$t_{ex} = 32.6 + 0.066 t_a + 32 W_a \quad (10)$$

$$W_{ex} = 0.0277 + 0.000065 t_a + 0.2 W_a \quad (11)$$

ifadeleriyle bulunabilir [2]. İnsan vücudunun ısı dengesi, çevre ile ısı etkileşimleri ifade eden yarı kuramsal yarı ampirik bir yaklaşım içerir. Duyulur ve gizli ısı geçiş mekanizmalarını ifade etmek için temel ısı geçiş denklemleri, ısı geçişini etkileyen katsayıların belirlenmesi için ise deneysel bağıntılar kullanılır. Ayrıca yine deneysel denklemlerden fizyolojik denetim mekanizmalarını iç ve deri sıcaklığının fonksiyonu olarak ifade etmek için yararlanılır.

Sıcaklık Denetim Sinyalleri ve Tepkiler

Sıcaklık denetim mekanizmaları (vazodilatasyon, vazokonstriksiyon, terleme, titreme), deriden ve iç bölgeden gelen sıcaklık sinyalleri ile harekete geçmektedir. İşlemleri beş sinyal başlatmaktadır. Bu sinyaller; iç bölgeden gelen sıcak sinyal (WSIG_{cr}), iç bölgeden gelen soğuk sinyal (CSIG_{cr}), deriden gelen sıcak sinyal (WSIG_{sk}), deriden gelen soğuk sinyal (CSIG_{sk}) ve vücuttan gelen sıcak sinyal (WSIG_b). Bu sinyaller tabakaların nötr sıcaklıkları ile gerçek sıcaklıkları arasındaki fark olarak tanımlanmıştır ve sadece pozitif değerler alabilirler:

$$WSIG_{\alpha} = \begin{cases} 0 & t_{\alpha} \leq t_{\alpha,n} \\ t_{\alpha} - t_{\alpha,n} & t_{\alpha} > t_{\alpha,n} \end{cases} \quad (12)$$

$$CSIG_{\alpha} = \begin{cases} t_{\alpha,n} - t_{\alpha} & t_{\alpha} < t_{\alpha,n} \\ 0 & t_{\alpha} \geq t_{\alpha,n} \end{cases} \quad (13)$$

$$WSIG_{sk} = \begin{cases} 0 & t_{sk} \leq t_{sk,n} \\ t_{sk} - t_{sk,n} & t_{sk} > t_{sk,n} \end{cases} \quad (14)$$

$$CSIG_{sk} = \begin{cases} t_{sk,n} - t_{sk} & t_{sk} < t_{sk,n} \\ 0 & t_{sk} \geq t_{sk,n} \end{cases} \quad (15)$$

$$WSIG_b = \begin{cases} 0 & t_b \leq t_{b,n} \\ t_b - t_{b,n} & t_b > t_{b,n} \end{cases} \quad (16)$$

Vücutun toplam kütlelerinin deri bölmesinde bulunan kısmı a olmak üzere, vücudun ortalama sıcaklığı, deri ve iç vücut sıcaklıklarının ağırlıklı ortalaması alınarak aşağıda verilen denklem yardımıyla bulunabilir.

$$t_b = \alpha t_{sk} + (1 - \alpha)t_{\alpha} \quad (17)$$

Vücut, soğuğa karşı korunmak için deri ve deriye yakın dokulara vazokonstriksiyon işlemleriyle kan akışını azaltır. Bu tepki deriyi ve ona yakın dokuları soğutmasına karşın iç dokuların sıcaklığını korur. Vazokonstriksiyon, deriden gelen soğuk sinyallerle denetlenir. İç vücuttan gelen soğuk sinyaller de vazokonstriksiyona neden olur ancak etkisi deriden gelen soğuk sinyaller kadar önemli değildir [2]. İç vücut ve deri sıcaklıklarının nötr değerden sapmalarının kan akışı üzerindeki etkileri matematiksel olarak aşağıda verilen denklem ile ifade edilmiştir.

$$\dot{m}_{b1} = [(6.3 + 200 WSIG_{\alpha}) / (1 + 0.5 CSIG_{sk})] / 3600 \quad (18)$$

Eşitlik (18) ile verilen kan debisindeki değişimler, deri ve iç vücut bölmelerinin etkin kütlelerini değiştirecektir. Vücutun toplam kütlelerinin deri bölmesinde bulunan kısmını simgeleyen a değeri aşağıdaki bağıntı ile verilmiştir [2].

$$\alpha = 0.0418 + 0.745 / (3600 \dot{m}_{b1} + 0.585) \quad (19)$$

İki bölmeli anlık enerji dengesi modelinde, iç bölme ile deri arasındaki ısı geçişi aşağıdaki bağıntı ile verilmiştir.

$$Q_{\alpha,sk} = (K + c_{p,b1} \dot{m}_{b1})(t_{\alpha} - t_{sk}) \quad (20)$$

Titreme ile metabolik enerji üretimi hem deri hem de iç vücuttan eşzamanlı soğuk sinyallerin gönderilmesini gerektirir ve bu iki sinyal ilişkisi,

$$M_{shiv} = 19.4 CSIG_{sk} CSIG_{\alpha} \quad (21)$$

eşitliğiyle verilmiştir. Bu durumda vücutta üretilen toplam metabolik enerji (M), aktivite yani yapılan iş sırasında üretilen (M_{act}) ile titremeden kaynaklanan (M_{shiv}) enerjilerin toplanmasıyla bulunabilir.

$$M = M_{act} + M_{shiv} \quad (22)$$

Vücutta üretilen toplam metabolik enerji ve vücuttan çevreye olan toplam ısı kayıpları hesaplandıktan sonra iç bölme ve deride depolanan ısı enerjiler bu bölmelerin sıcaklıklarının değişmesine neden olur. Bu etki, Bu etki q saniye olmak üzere,

$$dt_{\sigma} / d\theta = S_{\sigma} A_D / ((1 - \alpha)mc_{p,b}) \quad (23)$$

$$dt_{sk} / d\theta = S_{sk} A_D / (\alpha mc_{p,b}) \quad (24)$$

eşitlikleriyle ifade edilebilir. Isıl olarak konforsuzluğu gösteren DISC değeri soğuk ve sıcak ortamlar için -5 ile +5 arasında değişen toplam 11 noktalı sayısal ölçeğe dayanmaktadır. Bu ölçek, 0 için rahat, konforlu, ± 1 için rahatsız fakat kabul edilebilir, ± 2 için rahatsız, ± 3 için çok rahatsız, ± 4 için sınırlı ölçüde dayanılabilir, ± 5 için dayanılmaz şartlarını göstermektedir. DISC değeri, $t_b < t_{b,c}$ için;

$$t_{b,c} = (0.194 / 58.15)(M - W) + 36.301 \quad (25)$$

$$DISC = 0.4685 (t_b - t_{b,c}) \quad (26)$$

bağıntıları ile belirlenir.

ÇALIŞMA BULGULARI ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, -10°C sıcaklık, %50 bağıl nem koşullarına sahip bir ortamdaki dinlenme durumunda (vücudun ürettiği enerji oranı yaklaşık 60 W/m^2) ve orta kalınlıkta giysili (0.9 clo) bir insanın toplam metabolik enerji üretiminde, deriden ve solunum yoluyla olan ısı kayıplarında, iç bölme ve deri sıcaklıklarında meydana gelen değişimler ve bu değişimlere vücut denetim mekanizmalarının verdiği tepkiler incelenmiştir. Soğuğa karşı denetim mekanizmalarından vazokonstriksiyon ve titremenin vücudun iç bölme ve deri tabakası sıcaklıklarını ne ölçüde etkilediği karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaların yapılabilmesi için insan vücudu 4 durumda incelenmiştir. I. durumda, vazokonstriksiyon ve titreme etkileri göz önüne alınmış; II. durumda, titreme etkileri ihmal edilmiş; III. durumda, vazokonstriksiyon etkileri ihmal edilmiş; IV. durumda, hem vazokonstriksiyon hem de titreme etkileri ihmal edilmiştir. Her durum için, deri ve iç bölme sıcaklıkları, iç bölmeden deri tabakasına ve vücuttan çevreye olan toplam ısı kayıpları, kan debisi ve ısıl konforsuzluk indisinin değişimi grafikler halinde sunulmuştur.

Sürecin başlangıcında vücut nötr koşullarda ($t_{sk,n} = 33.7^{\circ}\text{C}$, $t_{cr,n} = 36.8^{\circ}\text{C}$) kabul edilerek dört durum için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamaların ilk aşamasında, çevresel koşullardan hareketle operatif sıcaklık (t_b) ve bu koşullara ilave olarak vücut üzerindeki giysilerin direnciyle toplam ısı ve buharlaşma dirençleri (R_t ve $R_{e,t}$) bulunmuştur. Eşitlik (3) kullanılarak deriden toplam (duyulur ve gizli) ısı kaybı, eşitlik (7) ile (11) arasında verilen bağıntılardan yararlanarak solunum kayıpları, deri ve iç bölme sıcaklıklarından hareketle

denetim sinyalleri ve eşitlik (18) ile (20) arasında verilen ifadelerle vücudun fizyolojik denetim mekanizmalarının gösterdiği tepkiler hesaplanmıştır. İç bölme ve derinin enerji dengesini gösteren sırasıyla eşitlik (1) ve (2) ile bu bölmelerde birim zamanda depolanan enerjiler, eşitlik (23) ve (24) ile sıcaklık değişimleri belirlenmiştir. Tüm bu işlemler her zaman adımı için yapılarak vücut sıcaklıkları, ısı kayıpları ve fizyolojik parametrelerin değişimi elde edilmiştir.

Tablo 1'de titreme ve vazokonstriksiyon etkilerinin göz önüne alındığı I. durum için vücut sıcaklıkları, deri bölmesine gönderilen kan akışı, deriden duyulur olan ısı kaybı, solunum kayıpları, ve toplam metabolik enerji üretimindeki değişimler verilmiştir. Tablo 2, 3 ve 4'de ise sırasıyla II., III. ve IV. durumlar için simülasyondan elde edilen veriler yer almaktadır. I. durumda vücudu soğuğa karşı koruyan denetim mekanizmalarının her ikisi de göz önüne alındığından iç bölme sıcaklığı 36.59°C'ye, deri sıcaklığı ise 22.61°C'ye kadar inerken titreme etkilerinin ihmal edildiği II. durum için bu değerler sırasıyla 34.92°C ve 22.34°C sıcaklıklarına gerilemiştir. II. durumda titremeden kaynaklanan ilave bir ısı üretimin olmayışı vücudun iç ve deri bölmesi sıcaklıklarının düşmesine neden olmuştur. Deri ve iç bölme sıcaklıklarının tüm durumlar için değişimi Şekil 2 ve 3'de verilmiştir.

Vücuttan olan toplam ısı kaybı (Q_{top}) solunum, buharlaşma, taşınım ve ışınım yollarıyla olan ısı kayıplarının toplamını ifade etmektedir. Terleme olmaması nedeniyle toplam ısı kaybı, önemli ölçüde deriden olan duyulur ısı kaybına bağlı olduğundan zamanla deri sıcaklığının düşmesi, duyulur ısı kaybını azaltmakta böylece toplam ısı kaybı azalmaktadır. Toplam ısı kaybı I. durumda başlangıçta 185 W/m² iken 2 saatin sonunda bu değer 147 W/m²'ye inmektedir. Yine t_{sk} sıcaklığının düşmesiyle deri yüzeyinde su buharının kısmi basıncı azalmakta ve bu da terin difüzyon yoluyla olan ısı kaybını azaltmaktadır. Solunumla olan ısı kayıpları ise başlangıçta sabit kalmakta daha sonra titremenin devreye girmesiyle vücudun toplam metabolik ısı üretimi artması sonucu artmaktadır. Toplam metabolik ısı üretiminin artması solunum debisini artırarak bu yolla olan duyulur ve gizli ısı kayıplarını artırmaktadır.

Tablo 1. Tireme ve vazokonstriksiyon etkilerinin olduğu I. durum için vücut fizyolojisindeki değişimler

Zaman (dakika)	t_{sk} (°C)	t_{cr} (°C)	m_{bl}^* (g/s.m ²)	CR (W/m ²)	Q_{res} (W/m ²)	M (W/m ²)
1	33.31	36.81	1.694	169.48	9.13	60.00
10	30.80	36.81	0.855	159.64	9.13	60.00
20	29.21	36.79	0.539	153.44	9.33	61.27
30	28.03	36.74	0.456	148.79	10.09	66.26
40	27.05	36.70	0.405	144.99	11.12	73.02
50	26.23	36.66	0.369	141.75	12.13	79.65
60	25.51	36.64	0.344	138.96	12.99	85.35
70	24.88	36.62	0.324	136.50	13.71	90.03
80	24.33	36.61	0.308	134.32	14.30	93.93
90	23.83	36.61	0.295	132.38	14.81	97.25
100	23.38	36.60	0.284	130.63	15.25	100.16
110	22.98	36.60	0.275	129.04	15.64	102.74
120	22.61	36.59	0.267	127.61	16.00	105.07

Tablo 2. Titreme Etkilerinin İhmal Edildiği II. Durum İçin Vücut Fizyolojisindeki Değişimler

Zaman (dakika)	t_{sk} (°C)	t_{cr} (°C)	\dot{m}_{bl} (g/s.m ²)	CR (W/m ²)	Q_{res} (W/m ²)	M (W/m ²)
1	33.31	36.81	1.694	169.48	9.13	60.00
10	30.80	36.81	0.855	159.64	9.13	60.00
20	29.21	36.78	0.539	153.44	9.13	60.00
30	28.02	36.72	0.456	148.79	9.13	60.00
40	27.05	36.62	0.404	144.97	9.13	60.00
50	26.21	36.49	0.369	141.71	9.13	60.00
60	25.49	36.32	0.343	138.86	9.13	60.00
70	24.84	36.13	0.322	136.32	9.13	60.00
80	24.25	35.92	0.306	134.03	9.13	60.00
90	23.72	35.70	0.292	131.94	9.13	60.00
100	23.22	35.45	0.281	130.01	9.13	60.00
110	22.77	35.19	0.271	128.22	9.13	60.00
120	22.34	34.92	0.262	126.55	9.13	60.00

Zamanla iç bölme ve deri sıcaklıkları arasındaki farkın artması iç bölmeden deriye olan ısı geçişini artırmaktadır (Şekil 4). İç bölme sıcaklığını azaltıcı yönde etki eden solunum ve iç bölmeden deri tabakasına olan ısı kayıpları, kısmen vazokonstriktif etkilerle a'nın artmasıyla kısmen de titreme sonucu toplam metabolik enerjinin artmasıyla dengelenmektedir. Bu şekilde t_{cr} sıcaklığı vücudun hayati fonksiyonlarının sürdürülebilmesi için korunmuş olur. Ancak t_{cr} sıcaklığının düşmemesi için sadece vazokonstriksiyon yeterli olmadığından Tablo 1'den görüldüğü gibi 15. dakikadan itibaren titreme devreye girmekte ve toplam metabolik ısı üretimi aktiviteden kaynaklanan 60 W/m² değerini aşmaktadır. 2 saatin sonunda titreme ile birim zamanda üretilen enerji 45 W/m²'ye ulaşmaktadır. Bu işlemin etkisi özellikle II. (titreme etkisinin ihmal edildiği) durum ile karşılaştırıldığında daha rahat anlaşılabilir. II. durumda t_{cr} sıcaklığı I. duruma göre hızlı bir şekilde azalmakta ve 2 saat sonunda 34.92°C'ye, t_{sk} sıcaklığı ise 22.34°C'ye düşmektedir. Bu arada iç bölme sıcaklığının 35°C sıcaklığın altına inmesinin tehlikeli olabileceği ve dinlenme durumundaki bir insanın uyuşma hissetmeden dayanabileceği ortalama deri sıcaklığının alt sınırının 25°C olduğu unutulmamalıdır [2].

II. durumda, t_{sk} ve t_{cr} sıcaklıkları arasındaki fark I. duruma göre bir miktar düştüğünden iç bölme ile deri arasındaki ısı geçişi ve vücuttan olan toplam ısı kaybı azalmıştır (Şekil 4 ve 5). Titreme ile ilave bir ısı üretimi olmadığından solunum yoluyla olan ısı kayıpları sabit kalmaktadır. Deri bölmesine gönderilen kan debisi ise I. duruma göre çok az oranda daha düşüktür (Tablo 1). Bunun nedeni, deri sıcaklığının azalmasından dolayı iç bölme sıcaklığının korunabilmesi için deriye olan kan akışının azaltılmasıdır.

Vazokonstriksiyonun etkisinin ihmal edildiği III. durumda vücut sıcaklığının korunabilmesi için 5. dakikadan itibaren titreme ile ısı üretimi mekanizması devreye girmektedir. Bu şekilde t_{sk} ve t_{cr} sıcaklıklarındaki düşüş azaltılmıştır ve 2 saat sonunda bu sıcaklıklar sırasıyla 25.04°C ve 36.17°C'dir. Titreme, I. duruma göre erken başladığı gibi bu yolla üretilen metabolik enerji de yaklaşık 105 W/m² gibi yüksek değerlere çıkmaktadır (Tablo 3). Bu değer, I. durumda titreme ile üretilen metabolik enerjinin 2 katından fazladır. Vazokonstriksiyon etkilerinin olmaması vücudu titreme mekanizması ile korumaya yöneltmiştir.

III. durumdaki ısı kayıpları incelendiğinde, tüm ısı kayıplarının diğer durumlara göre arttığı görülmektedir (Tablo 3 ve Şekil 4, 5). Bunun nedeni, titremenin etkisiyle vücuttan üretilen toplam metabolik ısının yüksek oluşudur. En belirgin artış iç bölmeden deriye olan ısı kayıplarında olmuştur. Bunun en önemli nedeni, soğuktan dolayı oluşan vazokonstriksiyon etkisinin ihmal edilmesi yani, sıcaklık denetim sinyalleri ile kan debisindeki azalmanın gözardı edilmesi, dolayısıyla kan akışının yüksek değerlerde kalmasıdır (Tablo 3). Böylece iç bölmeden deriye olan ısı transferi diğer durumlara göre daha yüksek olmaktadır. III. durumda bütün ısı kayıplarının artmış olmasına karşın t_{sk} ve t_{cr} sıcaklıklarının II. ve IV. durumlara göre daha yüksek olması, titreme ile olan ısı üretiminin ısı kayıplarını karşılayabilmesiyle açıklanabilir.

Tablo 3. Vazokonstriksiyon Etkilerinin İhmal Edildiği III. Durum İçin Vücut Fizyolojisindeki Değişimler

Zaman (dakika)	t_{sk} (°C)	t_{cr} (°C)	\dot{m}_{bl} (g/s.m ²)	CR (W/m ²)	Q_{res} (W/m ²)	M (W/m ²)
1	33.31	36.81	1.75	169.47	9.13	60.00
10	30.49	36.75	1.75	158.43	9.60	63.07
20	28.49	36.59	1.75	150.62	12.39	81.38
30	27.23	36.43	1.75	145.68	16.17	106.23
40	26.42	36.32	1.75	142.51	19.43	127.61
50	25.90	36.25	1.75	140.48	21.71	142.60
60	25.57	36.22	1.75	139.18	23.15	152.09
70	25.36	36.20	1.75	138.36	24.02	157.80
80	25.23	36.19	1.75	137.84	24.54	161.17
90	25.14	36.18	1.75	137.51	24.84	163.15
100	25.09	36.18	1.75	137.31	25.02	164.32
110	25.06	36.17	1.75	137.18	25.12	165.01
120	25.04	36.17	1.75	137.11	25.18	165.42

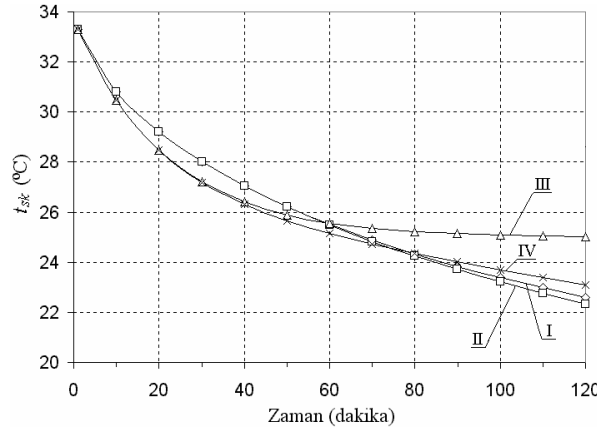
Tablo 4. Titreme ve Vazokonstriksiyon Etkilerinin İhmal Edildiği IV. Durum İçin Vücut Fizyolojisindeki Değişimler

Zaman (dakika)	t_{sk} (°C)	t_{cr} (°C)	\dot{m}_{bl} (g/s.m ²)	CR (W/m ²)	Q_{res} (W/m ²)	M (W/m ²)
1	33.31	36.81	1.75	169.47	9.13	60.00
10	30.49	36.75	1.75	158.43	9.13	60.00
20	28.49	36.54	1.75	150.60	9.13	60.00
30	27.19	36.24	1.75	145.53	9.13	60.00
40	26.30	35.89	1.75	142.06	9.13	60.00
50	25.66	35.52	1.75	139.52	9.13	60.00
60	25.15	35.13	1.75	137.54	9.13	60.00
70	24.73	34.74	1.75	135.88	9.13	60.00
80	24.35	34.35	1.75	134.42	9.13	60.00
90	24.01	33.96	1.75	133.08	9.13	60.00
100	23.69	33.57	1.75	131.82	9.13	60.00

110	23.38	33.19	1.75	130.61	9.13	60.00
120	23.08	32.81	1.75	129.43	9.13	60.00

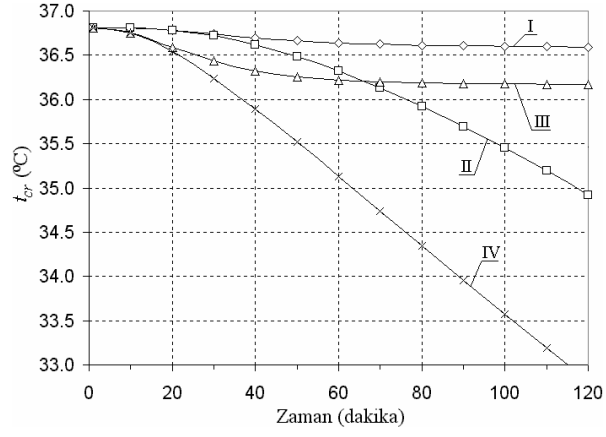
IV. durumda, vücudun soğuğa karşı koruma mekanizmalarından hiçbiri devrede olmadığından t_{cr} tüm durumlar arasında en düşük sıcaklığa yani 32.81°C 'ye inmiştir. t_{sk} sıcaklığı, II. duruma göre biraz daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni, II. durumda vazokonstriksiyon etkisiyle t_{cr} sıcaklığının korunabilmesi amacıyla dış bölme kan akışının azaltılmış olmasıdır. I. ve II. durumlarda da aynı etkiden dolayı iç bölmeden deri bölmesine olan ısı transferi diğer durumlara göre daha düşüktür (Şekil 4). IV. durumda vücudun ortalama deri sıcaklığı düşük olması nedeniyle de duyulur ısı kayıpları diğer durumlara göre düşük kalmaktadır. Benzer sebep-sonuç ilişkisi II. durumda da söz konusudur.

Isıl konforsuzluğu gösteren DISC değeri ise, I. durumda 19. dakikadan itibaren -1° 'in altına inmekte ve 2 saat sonunda -3.46 değerine ulaşmaktadır (Şekil 6). Yani, insanın böyle bir ortamda ya daha kısa süreli kalması ya da giysi kalınlığını artırması veya hareket ederek metabolik ısı üretimini yani aktivitesini artırması gerekmektedir. Titreme etkisinin ihmal edildiği II. durum incelendiğinde ise, DISC -3.86 değerine kadar düşmekte yani kişinin bulunduğu ortama sınırlı ölçüde dayanabileceği anlaşılmaktadır.

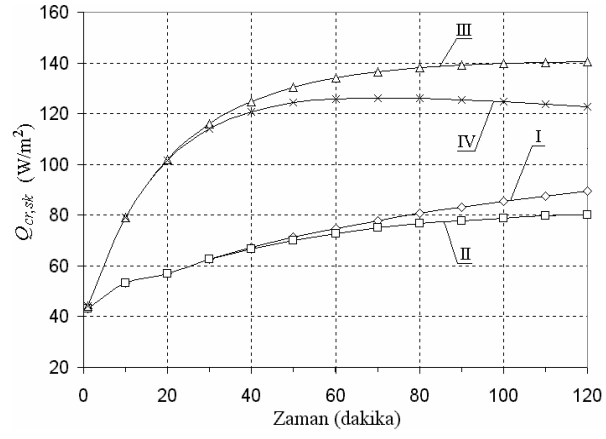


Şekil 2. Deri Bölmesi Sıcaklığının Değişimi

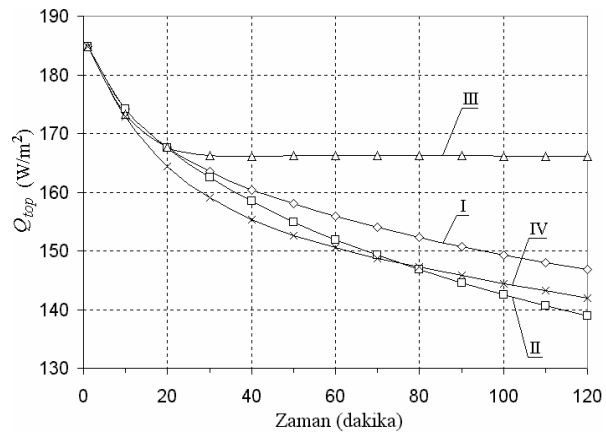
IV. durumdaki DISC değeri -2.41 'e ulaşmakta ancak bundan daha önemli bir husus t_{sk} ve t_{cr} sıcaklıklarındaki düşüşlerdir. I. durumda t_{sk} 25°C 'nin altına 69. dakikada inmekte ve t_{cr} sıcaklığı 35°C 'nin altına 2 saat süresi boyunca inmemektedir. II. durumda t_{sk} 68. dakikada, t_{cr} 118. dakikada; III. durumda t_{sk} ve t_{cr} 2 saat süresi boyunca sırasıyla 25°C ve 35°C 'nin altına inmemekte; IV. durumda ise t_{sk} ve t_{cr} 64. dakikada kritik sıcaklıkların altına inmektedir. Görüldüğü gibi titremenin olduğu (I. ve III.) durumlarda, t_{cr} sıcaklığı 2 saat süresi boyunca 35°C 'nin altına inmemekte ancak vazokonstriksiyon etkilerinin ihmal edildiği III. durumda deri sıcaklığı I. duruma göre daha çabuk 25°C 'nin altına inmektedir. II. ve IV. durumların karşılaştırılmasından vazokonstriksiyonun vücut sıcaklıkları üzerine etkisi rahat olarak gözlemlenebilir. II. durumda vazokonstriksiyondan dolayı t_{sk} ve t_{cr} sıcaklıkları daha geç kritik sıcaklıkların altına inmektedir.



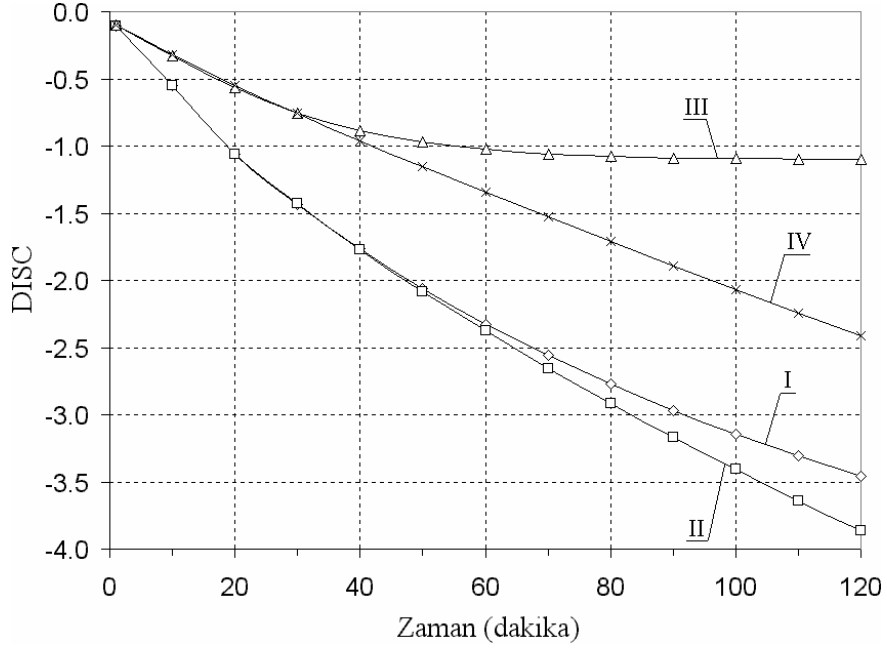
Şekil 3. Vücut İç Bölme Sıcaklığının Değişimi



Şekil 4. İç bölmeden deriye olan ısı kaybının değişimi



Şekil 5. Vücuttan olan toplam ısı kaybının değişimi



Şekil 6. Isıl Konforsuzluk (DISC) İndisinin Değişimi

SONUÇ

Deriden çevreye olan ısı geçişinin arttığı durumlarda vücut, vazokonstriksiyon (damarların kısılması) işlemleriyle deriye olan kan akışını azaltır. t_{sk} ve t_{cr} sıcaklıklarının nötr değerlerinin altına inmesi durumunda ise titreme ile ısı üretimi yoluna gider. Her iki işlemde temelde vücut iç sıcaklığını korumaya yöneliktir.

Bu çalışmada özellikle vazokonstriksiyon ve titremenin vücuttan olan ısı kayıplarını, ısı konfor şartlarını, vücut iç ve deri sıcaklıklarını nasıl ve ne ölçüde etkilediği üzerinde durulmuştur. Çalışma sonunda varılan sonuçlar özetle şunlardır;

- Titreme ile vücudun ürettiği ısı enerji arttığından vücut sıcaklıklarındaki düşüş en az bu durumlarda (I. ve III. durum) gerçekleşmiştir.
- III. durumda titreme ile artan ısı enerjinin yanı sıra vazokonstriksiyon etkilerinin olmaması t_{sk} sıcaklığının diğer durumlara göre daha yüksek çıkmasına neden olmuştur. Ancak, t_{sk} sıcaklığının yüksek olması nedeniyle duyulur ısı kayıpları, metabolik aktivitenin yüksek olması nedeniyle de solunum kayıpları en fazla bu durumda olmaktadır.
- Vazokonstriksiyon işlemi deri bölgesine kan akışını azaltarak a değerini artırdığından derinin iç vücutla ilişkisini kesmektedir. Bu işlem deri ve ona yakın bölgelerdeki sıcaklıkları azaltsa da t_{cr} sıcaklığını korumaktadır. Fakat t_{cr} sıcaklığını istenilen değerde tutması açısından titreme kadar etkili değildir. Titremenin ihmal edildiği II. ve IV. durumlarda bu etki görülmektedir. Bu şartlarda t_{cr} sıcaklığı diğer durumlara göre daha küçük çıkmıştır.

- Vazokonstriksiyon etkisinin ihmal edildiği III. durumda, vücudun soğuğa karşı tek korunma mekanizması titreme olduğundan, titreme I. duruma göre daha çabuk devreye girmekte ve şiddeti çok hızlı olarak artmaktadır.
- Vazokonstriksiyon özellikle deriden gelen soğuk sinyallere daha duyarlıdır. İç vücuttan gelen soğuk sinyaller de vazokonstriksiyona neden olur ancak etkisi deriden gelen soğuk sinyaller kadar önemli değildir. I. durumda titreme olmasına rağmen deriden gelen soğuk sinyaller doğrultusunda vazokonstriksiyon ile kan debisi %85 oranında azalmıştır.
- Titreme ve kas gerilmesi yoluyla metabolik ısı üretimi soğuk ortamlarda vücudun ısı dengesini koruması açısından damarlarda vazokonstriksiyona oranla daha etkili bir mekanizmadır. Titreme etkisinin ihmal edildiği (II. ve IV.) durumlarda, t_{sk} ve t_{cr} sıcaklıklarında daha hızlı düşüş olmaktadır.

SEMBOLLER

A_D	Çıplak vücut için DuBois yüzey alanı, m^2
ATP	Adenozin trifosfat
C	Deriden taşınım ile olan ısı kaybı oranı, W/m^2
$c_{p,a}$	Havanın özgül ısısı, $kJ/(kg.K)$
$c_{p,bl}$	Kanın özgül ısısı, $kJ/(kg.K)$
$c_{p,b}$	Vücut dokularının özgül ısısı, $(kJ/kg.K)$
C_{res}	Solunum nedeniyle duyulur ısı kaybı oranı, W/m^2
CR	Deriden toplam duyulur ısı kaybı oranı, W/m^2
DISC	Isıl konforsuzluk
E_{res}	Solunum nedeniyle gizli ısı kaybı oranı, W/m^2
E_{sk}	Deriden toplam gizli ısı kaybı oranı, W/m^2
f_{cl}	Giysi alan faktörü, boyutsuz
h_c	Taşınım ile ısı geçiş katsayısı, $W/(m^2.K)$
h_{fg}	Suyun buharlaşma gizli ısısı, kJ/kg
h_r	Işınım ile ısı geçiş katsayısı, $W/(m^2.K)$
h_e	Buharlaşma ile ısı geçiş katsayısı, $W/(m^2.kPa)$
K	İç vücut ile deri arasında etkin iletim katsayısı,

$W/(m^2.K)$

K_{res} Oranlama sabiti, 2.58×10^{-6} (kg.m²)/J

m Vücut kütlesi, kg

M Toplam metabolik ısı üretim oranı, W/m²

M_{act} Hareketten kaynaklanan metabolik ısı üretim oranı, W/m²

M_{shiv} Titremeden kaynaklanan metabolik ısı üretim oranı, W/m²

\dot{m}_{bl} İç vücut ile deri arasındaki kan debisi, kg/(s.m²)

\dot{m}_{res} Solunum debisi, kg/s

p_a Çevre ortamı için kısmi subuharı basıncı, kPa

$p_{sk,s}$ t_{sk} sıcaklığında doymuş havada kısmi subuharı basıncı, kPa

$Q_{cr,sk}$ İç vücuttan deriye olan ısı akısı, W/m²

Q_{sk} Deriden toplam ısı kaybı oranı, W/m²

Q_{top} Vücuttan olan toplam ısı kaybı oranı, W/m²

R Deriden ışınila olan ısı kaybı oranı, W/m²

R_{cl} Giysinin ısı yalıtımı, (m².K)/W

$R_{e,cl}$ Giysinin buharlaşma direnci, (m².kPa)/W

R_t Toplam ısı yalıtımı, (m².K)/W

$R_{e,t}$ Toplam buharlaşma direnci, (m².kPa)/W

S_{cr} Birim zamanda iç bölmede depolanan ısı enerjisi, W/m²

S_{sk} Birim zamanda deride depolanan ısı enerjisi, W/m²

t_a Ortam sıcaklığı, °C

t_b Vücut ortalama sıcaklığı, °C

$t_{b,n}$ Nötr ortalama vücut sıcaklığı, °C

$t_{b,c}$ Buharlaştırma denetimi bölgesinin alt sınırı, °C

t_{cr} İç bölme sıcaklığı, °C

$t_{cr,n}$ Nötr iç bölme sıcaklığı, 36.8 °C

t_{ex} Dışarı solunan hava sıcaklığı, °C

t_o Operatif sıcaklık, °C

t_{sk} Deri bölmesi sıcaklığı, °C

$t_{sk,n}$ Nötr deri bölmesi sıcaklığı, 33.7 °C

*
 t_r Ortalama ışıınım sıcaklığı, °C

w Deri ıslaklığı, boyutsuz

W Yapılan dış iş oranı, W/m²

W_a Çevre havasının özgül nemi, kgH₂O / kg kuru hava

W_{ex} Dışarı solunan havanın özgül nemi, kgH₂O / kg kuru hava

a Toplam vücut kütleinin deride olan bölümü

q Zaman, saniye

KAYNAKÇA

- 1. Aizawa, S. and Cabanac, M.** (2000). Temperature Gradient across the Skin's Layer Has no Influence on Local Skin Vasomotor Responses. *Journal of Thermal Biology*, 25, pp.313-316.
- 2. ASHRAE,** (1989). *ASHRAE Handbook - Fundamentals*, Chapter 8, Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. 29p.
- 3. ASHRAE,** (1993). *ASHRAE Handbook - Fundamentals*, Chapter 37, Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.
- 4. Butera, F.M.** (1998). Chapter 3- Principles of Thermal Comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2, pp.39-66.
- 5. Chaffee, E.E. and Greisheimer, E.M.** (1964). *Basic Physiology and Anatomy*. J.B. Lippincott Comp., Philadelphia, Montreal.
- 6. Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J. and Nishi, Y.** (1971). An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Response-Part 1. *ASHRAE Transactions*, 77, pp.247-262.
- 7. McCullough, E.A., Jones, B.W. and Tamura, T.** (1989). A Data Base for Determining the Evaporative Resistance of Clothing. *ASHRAE Transactions*, 95, 2, pp.316-328.

8. **Murakami, S., Kato, S. and Zeng, J.** (1997). Flow and Temperature Fields Around Human Body With Various Room Air Distribution-Part 1. ASHRAE Transactions, 103, pp.3-15.
9. **Tanebe, S., Arens, E.A. and Bauman, F.S.** (1994). Evaluating Thermal Environments by Using a Thermal Manikin With Controlled Skin Surface Temperature. ASHRAE Transactions, 100, 1, pp.39-48.
10. **Tunçer, N., Aydın, S. ve Zeytinođlu, M.** (2000). İnsan Anatomisi ve Fizyolojisi. Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir, 272p.
11. http://saglik.tr.net/genel_saglik_yaz_kalp.shtml
12. <http://www.gata.edu.tr/temelbilimler/biyokimya/seminer/hipotalamus.doc>
13. <http://www.genetikbilimi.com/gen/hipofiz.htm>
14. <http://www.isnet.net.tr/saglik/guncel/derimiz.asp>
15. <http://www.ott.doe.gov/coolcar/strategies.html>
16. <http://www.sualti.net/yazilar/hipotermi.htm>